

Die Versauerung der Meere

„climate change's equally evil twin“ (Rutgers, 2020)

Simon Baumgartner

Trotz globalen Vereinbarungen, wie etwa dem Pariser Klimaabkommen, steigen die weltweiten Kohlenstoffdioxid-Emissionen weiterhin und erreichten im Jahr 2023 einen neuen Spitzenwert. Diese Emissionen beeinflussen gemeinsam mit anderen Treibhausgasen maßgeblich unterschiedliche Faktoren des globalen Klimasystems. Doch es gibt noch eine weitere Auswirkung, die neben dem Klimawandel oft in den Schatten gedrängt wird: die Versauerung der Weltmeere. Dabei stellt diese Veränderung eine Bedrohung für zahlreiche marine Organismen und ganze Ökosysteme dar (Tiseo, 2023).

Ursache

Von den freigesetzten Kohlenstoffdioxid-Emissionen verbleibt lediglich ungefähr die Hälfte in der Atmosphäre. Zirka 25-30 Prozent werden von den Weltmeeren absorbiert, während der Rest von der Biosphäre aufgenommen wird. Das in den Meeren gelöste Kohlenstoffdioxid (CO_2) reagiert mit Wasser (H_2O) zu Kohlensäure (H_2CO_3), die später in Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) und Wasserstoffionen (H^+) zerfällt. Jene H^+ -Ionen können für ein Absinken des pH-Wertes sorgen. Die Ozeane verfügen zwar über ein Puffer-System durch natürlich vorkommendes Karbonat, das Wasserstoffionen bindet. Jedoch überstieg in den letzten Jahren die CO_2 -Aufnahme diese Puffer-Wirkung, weshalb der pH-Wert von 8,2 im vorindustriellen Zeitalter auf 8,1 sank. Dabei ist zu beachten, dass die pH-Skala eine logarithmische Skala ist. Die vermeintlich geringe Änderung des pH-Wertes um 0,1 bedeutet einen H^+ -Ionen-Anstieg von 30 %. Prognosen sagen einen weiteren Abfall auf einen pH-Wert von 7,9 bis 7,8 in den nächsten 50 bis 100 Jahren voraus, was in etwa einem Anstieg an Wasserstoffionen von 120 % entsprechen würde (Fuinotte, J. M. & Fabry, V. J., 2008; Hönisch, B. et al., 2012; BIOACID, o. D.).

Eine derartig drastische Veränderung in der chemischen Zusammensetzung der Ozeane kann unterschiedliche Auswirkungen auf die dort lebenden Organismen haben und ganze Ökosysteme bedrohen.

Erschwerte Skelettbildung

Die erhöhte Konzentration an Wasserstoffionen führt zu einer verringerten Konzentration an Calcit-Ionen, die im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter um zirka 16 % gesunken ist. Dies hat zur Folge, dass zahlreiche Meeresorganismen, wie etwa Weichtiere, Muscheln, Stachelhäuter oder Korallen, ihr Skelett aus Calciumkarbonat nur erschwert ausbilden können. Eine verminderte Stabilität der Schale von *Bivalvia* macht diese anfälliger für Raubtiere und stellt somit einen erhöhten Stressfaktor für diese Organismen dar. Auch bei verschiedenen Arten von Kalkflagellaten (*Coccolithophorida*) konnte bei Laborexperimenten eine verminderte Struktur des Kalkskelettes bei erhöhten pH-Werten festgestellt werden. Dabei konnten die Organismen die einzelnen Calcit-Plättchen, aus welchen sich ihr äußeres Skelett zusammensetzt, nicht mehr vollständig und nur auf deformierte Weise ausbilden. Jedoch gibt es auch Beispiele der Anpassung. So wurde in einer Küstenregion von Chile, wo auf natürliche Weise pH-Werte von 7,9 bis 7,6 vorherrschen, ein Stamm der *Coccolithophorida* gefunden, welche über ein sehr gut ausgeprägtes Kalkskelett verfügten. Diesem Stamm war es

anscheinend gelungen, sich an die vergleichsweise sauren Wasserbedingungen anzupassen. Aufgrund des raschen Tempos der momentanen Ozeanversauerung wird jedoch daran gezweifelt, ob sich alle betroffenen Arten rechtzeitig an die neuen Bedingungen anpassen können (De'ath et al., 2009; Welladsen et al., 2010; Diner et al., 2015).

Korallensterben

Korallenriffe sind Orte besonders hoher Biodiversität, weshalb diese auch als „Regenwälder der Meere“ bezeichnet werden. So beherbergen tropische Korallenriffe ein Viertel bis ein Drittel aller Arten von Meeresorganismen. Doch aufgrund der steigenden Meerestemperaturen und noch anderer Stressfaktoren geht die Ausdehnung dieser Lebensräume bereits jetzt zurück, und gut ein Drittel aller riffbildenden Korallen sind vom Aussterben bedroht. Die momentan erfolgende

Änderung der Ozeanchemie stellt einen weiteren Stressfaktor für Korallen dar, da auch sie aufgrund der verringerten Calcit-Konzentration nur erschwert ihre Skelette ausbilden können. Eine Studie von Fabricius et al. (2011) kam zu dem Schluss, dass die Bildung neuer Riffstrukturen bei einem pH-Wert von 7,7 endet, wobei andere Stressfaktoren nicht berücksichtigt wurden. Bei einer globalen Temperaturerhöhung von 2 °C würden vermutlich 99 % aller Warmwasserkorallen bis zum Jahr 2100 absterben (Fabricius et al., 2011; Plaisance et al., 2011; Carpenter et al., 2008; IPCC, 2018).

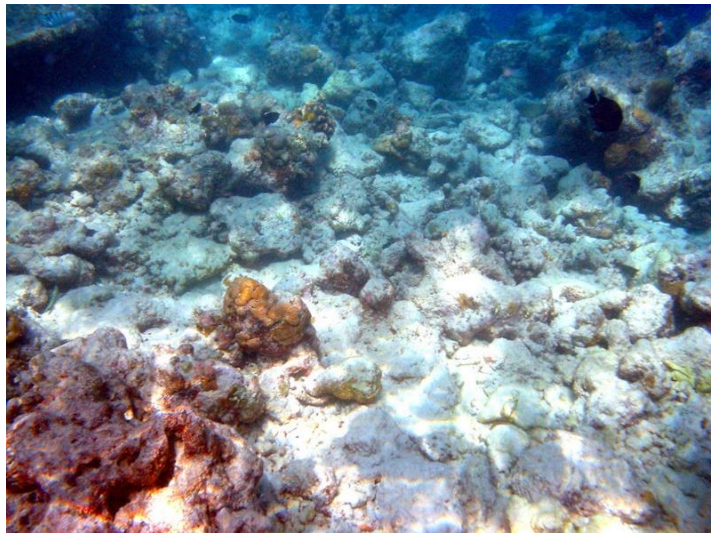


Abbildung 1: Abgestorbene Steinkorallen (Quelle: Bruno de Giusti)

Beeinträchtigung der olfaktorischen Fähigkeiten

Nicht nur kalkbildende Organismen sind von der Versauerung der Ozeane betroffen. Echte Clownfische (*Amphiprion percula*) verfügen über angeborene olfaktorische Fähigkeiten zur Raubtiererkennung. In Laborexperimenten mit Larven von echten Clownfischen kam es bei einem pH-Wert von 7,6 bzw. 7,8 des Wassers zu einer Beeinträchtigung ihres Geruchssinns. Zwar kam es zu keiner morphologischen Veränderung der Geruchsorgane, jedoch vermieden die Larven Geruchsstoffe von Nicht-Fressfeinden und es konnte teilweise sogar eine Attraktivität von Raubfisch-Geruchsstoffen festgestellt werden. Jedoch hielten sich die Larven vor allem in Wasser ohne jegliche Geruchsstoffe auf. Da sich Fischlarven für gewöhnlich in der Nacht niederlassen, sind sie währenddessen vor allem auf ihren olfaktorischen Sinn angewiesen. Deshalb befürchten manche Forscher, dass die Clownfischlarven bei verringerten pH-Wert der Ozeane aufgrund der Geruchsstoffe von anderen Fischen weg von den Riffen ins offene Meer getrieben werden könnten, da dort weniger Geruchsstoffe vorhanden sind. Dies könnte wiederum deren Überlebenschancen beeinträchtigen (Dixson et al., 2010; Munday et al., 2009).

Aufgrund der oben genannten gravierenden Folgen ist es wichtig, Prognosen für zukünftige Szenarien mit den Auswirkungen der Ozean-Versauerung zu machen. Laborversuche können immer nur gewisse Aspekte der Realität widerspiegeln. Doch es gibt Orte im Meer, sogenannte „champagne vents“, wo sich bereits jetzt die Auswirkungen eines verminderten pH-Wertes beobachten lassen.

Zusätzlich lässt ebenfalls ein Blick in die Vergangenheit der Erdgeschichte Einblicke in eine mögliche Zukunft unserer Weltmeere zu.

Champagne Vents

Bei champagne vents handelt es sich um hydrothermale Quellen. Diese befinden sich meist in der Tiefsee und stoßen unter anderem Gase wie Schwefel und CO₂ aus. Die Bezeichnung champagne kommt daher, dass diese Gase in Blasenform von den Quellen aufsteigen, was an die CO₂-Blasen in einem Champagner erinnert. Manche champagne vents befinden sich in seichteren Gewässern, wie beispielsweise in der Nähe des Vulkans Vesuv. Die dort gelegenen hydrothermalen Quellen geben keinen Schwefel ab und in ihrer Nähe herrschen auch keine erhöhten Wassertemperaturen, was ansonsten die umliegende Flora und Fauna beeinflussen würde. Jedoch geben die champagne vents in der Nähe des Vesuvs CO₂ ab, weshalb in ihrer unmittelbaren Nähe ein pH-Wert von 6,6 vorherrscht. Je weiter man sich von den Quellen entfernt, desto höher wird der pH-Wert. Daher eignen sich diese speziellen champagne vents, um die Auswirkungen einer pH-Änderung in der Natur zu beobachten. Eine dort durchgeführte Untersuchung zeigte, dass sich bei einem pH-Wert von 7,8 die allgemeine Individuen-Anzahl um 30 % reduziert hat, wobei deutlich weniger Arten mit Kalkskeletten, wie beispielsweise Schnecken, vorkamen (im Vergleich zu einem pH-Wert von 8,2). Algen und Seegräser waren hingegen überrepräsentiert (Hall-Spencer & Rauer, 2009).

PETM (Palaeocene-Eocene thermal maximum)

Ein erdgeschichtliches Ereignis, das einen Einblick über eine mögliche zukünftige Entwicklung in den Ozeanen gibt, ist das PETM. Dieses ereignete sich vor ungefähr 55,5 Millionen Jahre, wobei sich die Erde aufgrund von Vulkanismus über einen Zeitraum von zirka 20.000 Jahren um etwa 5 °C erwärmte. In den Meeren kam es zu einem Temperaturanstieg von ungefähr 6 °C und zugleich zu einer Versauerung. Dies war vermutlich ein Auslöser für ein Massenaussterben von benthischen Foraminiferen. Dies sind einzellige Organismen mit einem Gehäuse aus Calciumcarbonat. Ein schneller Temperaturanstieg sowie Senkung des pH-Wertes führten also bereits in der Vergangenheit zu einem Aussterbeereignis bei Organismen mit Kalk-Skeletten. Vergleicht man das PETM mit den jetzigen Entwicklungen, ist jedoch zu beachten, dass der momentane Anstieg des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids 10-mal schneller vonstattengeht als jener vor 55,5 Millionen Jahren. Dadurch vollzieht sich die jetzige Erwärmung 40-mal schneller: ca. 1 °C pro 100 Jahre im Vergleich zu 0,025 °C pro 100 Jahre (Guinotte & Fabry, 2008; Ridgwell & Schmidt, 2010).

Oft wird von den Auswirkungen der erhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre gesprochen. Doch ein wesentlicher Anteil der anthropogenen CO₂-Emissionen wird von den Weltmeeren aufgenommen. Dies verzögert zwar das Tempo der globalen Erwärmung, jedoch bewirkt es eine Versauerung der Meere. Eine fortschreitende Versauerung der Weltmeere bedroht zahlreiche Arten an Meeresorganismen und sogar ganze Ökosysteme, wie etwa die Korallenriffe. Somit kann sie vermutlich zurecht als „the climate change’s equally evil twin“ (Rutgers, 2020) bezeichnet werden.

Glossar

- Calcit (auch Kalzit oder Kalkspat)
Calcit ist ein Mineral mit der chemischen Formel $\text{Ca}[\text{CO}_3]$. Damit gehört es zur Gruppe der Calciumcarbonate. Diese verfügen alle über die gleiche chemische Zusammensetzung, unterscheiden sich aber in ihrer Kristallstruktur.
Ca.....Calcium
C.....Kohlenstoff
O.....Sauerstoff
Das Skelett von manchen Tieren, wie beispielsweise den Korallen oder den Stachelhäutern besteht aus diesem Mineral (Mortimer & Müller, 2015; Blüm et al., 1981).
- Weichtiere (*Mollusca*)
Die Vertreter dieses Tierstamms sind in der Mehrzahl im Meer zu finden, kommen aber auch an Land oder in Süßwasser vor. So umfasst er beispielsweise die Klassen der Kopffüßer, Muscheln und Schnecken (Hadorn & Wehner, 1978).
- Stachelhäuter (*Echinodermata*)
Dabei handelt es sich um einen Tierstamm, dessen Vertreter ausschließlich im Meer zu finden sind und überwiegend Bodenbewohner darstellen. Zu den Stachelhäutern gehören beispielsweise die Klassen der Seesterne, Seeigel, Seewalzen, sowie die der Seelilien (Hadorn & Wehner, 1978).
- Kalkflagellaten (*Coccolithophorida*)
Kalkflagellaten umfassen eine Vielzahl von unterschiedlichen einzelligen Algen, welche alle von einer äußeren Hülle aus Calcit-Plättchen (*Coccosphäre*) umschlossen sind. Meist sind sie nicht Größer als $20\ \mu\text{m}$ und gehören zu den planktonisch lebenden Vertretern der Kalkalgen (Blüm et al., 1981).
- olfaktorisch
= dem Riechnerv bzw. Geruchssinn betreffend (Blüm et al., 1981)
- benthisch
Unter benthischen Organismen versteht man Organismen, welche im Bereich des Gewässergrundes leben (Blüm et al., 1981).

Quellen

- BIOACID (o.D.). *Was ist Ozeanversauerung?*. Abgerufen am 23. November 2023, von <https://www.bioacid.de/ozeanversauerung/>
- Blüm, V., Czihak, G., Gottschalk, G., Hassenstein, B., Hauenschild, C., Haupt, W., Hess, D., Jacobs, J., Kümmel, G., Lange, O. L., Langer, H., Linskens, H. F., Nachtigall, W., Neumann, D., Osche, G., Rathmayer, W., Rautenberg, W., Schopfer, P., Sitte, P., Walter, H., Weberling, F., Weiler, E., Wieser, W., Ziegler, H. & Ziswiler, V. (1981). *Biologie* (3. Aufl.). Springer Verlag
- Carpenter, K. E., Abrar, M., Aeby, G., Aronson, R. B., Banks, S., Bruckner, A., Chriboga, A., Cortès, J., Delbeek, J. C., Devantier, L., Edgar, G. J., Edwards, A. J., Fenner, D., Guzmàn, H. M., Hoeksema, B. W., Hodgson, G., Johan, O., Licuanan, W. Y., Livingstone, S. R., Lovell, E. R., Moore, J. A., Obura, D. O., Ochavillo, D., Polidoro, B. A., Precht, W. F., Quibilan, M. C., Reboton, C., Richards, Z. T., Rogers, A. D., Sanciangco, J., Sheppard, A., Sheppard, C., Smith, J., Stuard, S., Turak, E., Veron, J. E. N., Wallace, C., Weil, E. & Wood, E. (2008). One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science*, 321, 560-563.
- De'ath, G., Lough, J. M., & Fabricius, K. E. (2009). Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, 323(5910), 116-119.
- Diner, R. E., Benner, I., Passow, U., Komada, T., Carpenter, E. J., & Stillman, J. H. (2015). Negative effects of ocean acidification on calcification vary within the coccolithophore genus *Calcidiscus*. *Marine Biology*, 162, 1287-1305.
- Dixon, D. L., Munday, P. L., & Jones, G. P. (2010). Ocean acidification disrupts the innate ability of fish to detect predator olfactory cues. *Ecology letters*, 13(1), 68-75.
- Fabricius, K. E., Langdon, C., Uthicke, S., Humphrey, C., Noonan, S., De'ath, G., Okazaki, R., Muehllhner, N., Glas, M. S. & Lough, J. M. (2011). Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Climate Change*, 1(3), 165-169
- Guinotte, J. M., & Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134(1), 320-342.
- Hall-Spencer, J., & Rauer, E. (2009). Champagne Seas—Foretelling the Ocean's Future?. *THE JOURNAL*, 25.
- Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D. N., Thomas, E., Gibbs, S. J., Sluijs, A., Zeebe, R., Kump, L., Martindale, R. C., Greene, S. E., Kiessling, W., Ries, J., Zachos, J. C., Royer, D. L., Barker, S., Marchitto, T. M., Moyer, R., Pelejero, C., Ziveri, P., Foster, G. & Williams, B. (2012). The geological record of ocean acidification. *Science*, 335(6072), 1058-1063.
- IPCC. (2018). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. *1,5 °C globale Erwärmung. Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut.*
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/07/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf
- Plaisance, L., Caley, M. J., Brainard, R. E. & Knowlton, N. (2011). *The Diversity of Coral Reefs: What Are We Missing?*. PLOS ONE.
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0025026>
- Mortimer, C. E. & Müller, U. (2015). *Chemie* (12. Aufl.). Georg Thieme Verlag.

- Munday, P. L., Dixson, D. L., Donelson, J. M., Jones, G. P., Pratchett, M. S., Devitsina, G. V., & Døving, K. B. (2009). Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1848-1852.
- Ridgwell, A., & Schmidt, D. N. (2010). Past constraints on the vulnerability of marine calcifiers to massive carbon dioxide release. *Nature Geoscience*, 3(3), 196-200.
- Rutgers. (2020, September). *What Is Ocean Acidification?*. Abgerufen am 17. Februar 2024, von https://njclimateresourcecenter.rutgers.edu/climate_change_101/ocean-acidification/
- Tiseo, I. (2023, 6. Dezember). *Annual carbon dioxide (CO₂) emissions worldwide from 1940 to 2023*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/#statisticContainer>
- Welladsen, H. M., Southgate, P. C., & Heimann, K. (2010). The effects of exposure to near-future levels of ocean acidification on shell characteristics of *Pinctada fucata* (Bivalvia: Pteriidae). *Molluscan Research*, 30(3), 125.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bruno de Giusti (2006). *Tote Steinkorallen*. CC BY-SA 2.5 it. Abgerufen am 17. Februar 2024, von https://de.wikipedia.org/wiki/Korallenbleiche#/media/Datei:Moofushi_bleached_corals.JPG